<Paper>

1 層毎交互巻高周波アモルファストランスを有する

直流連系用 DC-DC コンバータの特性

Characteristics of DC-DC Converter using High-Frequency Amorphous Transformer with Interleaved-Winding for HVDC Transmission System

大津 諭史†, 中村 健二

東北大学 大学院工学研究科,仙台市青葉荒巻字青葉 6-6-11 (〒980-8579)

S. Otsu [†], K. Nakamura

Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

In large-scale offshore wind-power generation, high voltage dc (HVDC) transmission system using dc-dc converters has attracted the attention in order to reduce the size and weight and to improve the system efficiency. In a previous paper, it was demonstrated that the copper loss of high-frequency transformer can be remarkably reduced by employing interleaved-winding since proximity effect is suppressed. This paper described prototype tests of a small-scale dc-dc converter using the high-frequency amorphous transformer with interleaved-winding. The efficiency of the dc-ac converter, transformer, diode rectifier, and the whole system are measured and compared to prove the superiority of the interleaved-winding against a conventional non-interleaved-winding.

Key words: HVDC transmission system, DC-DC converter, high frequency amorphous transformer, interleaved-winding

1. はじめに

近年,地球環境保護の観点から再生可能エネルギーの一 つである風力発電市場が伸長している.風力発電は,他の 再生可能エネルギーと比較して,発電コストが安価で設備 利用率が高く,スケールメリットが大きいことから,最近 では洋上に数十基の風力発電機を配置した,総容量 100 MW 以上の洋上ウインドファームの導入が欧州を中心に進 んでいる^{1),2)}. 今後は,さらに遠洋での大規模化が進むこと が予想されるが,そのためには,高効率な長距離送電技術 の確立が必須である.ここで,従来の高圧交流送電の場合, 送電線の電気抵抗に加え,浮遊容量や寄生インダクタンス による交流損失が問題になる.そのため,抵抗以外の損失 が原理的に発生しない,高圧直流(High Voltage Direct Current: HVDC)送電が注目されている.

Fig. 1 に,絶縁と昇圧の機能を具備した高周波リンク DC-DC コンバータを用いた,HVDC システムの基本構成を 示す³⁾.本システムでは,風車で発電された交流電力を整流 した後,DC-DC コンバータの DC/AC 変換部で周波数が数 kHz の方形波電圧を生成し,高周波トランスによって昇圧 後,再び AC/DC 変換部で整流して,HVDC 送電を行う. このような高周波化によって,トランスは小型軽量化され る一方で,鉄損の増加および巻線間に働く近接効果による 銅損の増加が懸念される.

上述の問題に対して,先に筆者らは,動作周波数が数 kHz のトランス材料には,アモルファス合金が適すること⁴⁾,近 接効果による銅損増加の抑制には、1層毎交互巻が有効であることを明らかにした⁵⁾.

また一方で、洋上風力発電用直流送電システムの小型模 擬実験システムを構築し、電圧一定制御法について検討を 行った結果、DC-DC コンバータの通流率を適切に制御する ことで、風況等による出力変動が生じても、DC リンク電圧 を一定に制御できることを実証した ⁶. ただし、本 DC-DC コンバータに 1 層毎交互巻高周波アモルファストランスを 用いた場合の挙動や効率などの諸特性に関する検討は未だ 不十分である.

そこで本稿では、上述の小型模擬実験システムを用いて、 1層毎交互巻高周波トランスを有する DC-DC コンバータの 特性について比較検討を行った.まず初めに、1層毎交互巻 高周波トランスの等価回路パラメータを実験から導出し、 DC-DC コンバータのシミュレーション結果と実験結果の 比較を行った.次いで、1層毎交互巻高周波トランスを有す る DC-DC コンバータの効率について詳細な検討を行った ので報告する.



Fig. 1 Basic configuration of HVDC transmission system of offshore wind power generation.

2. 1層毎交互巻高周波アモルファストランスの構成

Fig. 2 に、本稿での考察に用いたアモルファストランス の形状と寸法を示す.先の検討において、容量が数 MW ク ラスの風力発電における、DC-DC コンバータの動作周波数 は電力用半導体デバイスのスイッチング損失の観点から数 kHz が妥当であること、またその際のトランス材料として は、鉄損低減の観点からアモルファス合金が最適であるこ とを明らかにしている⁴.

さらに、周波数が数 kHz 程度であっても近接効果によっ て巻線抵抗は増加し、特に大容量器の場合には発熱の観点 からその抑制が必須であることを指摘するとともに、解決 策として一次、二次巻線を1層毎交互に配置した、1層毎交 互巻を提案している⁵⁾.

Fig. 3(a)に,一般的な重ね巻の巻線配置を示す.同図(b) が,筆者らが提案する1層毎交互巻の巻線配置である.一 次,二次巻線を1層毎交互に並べることで,巻線間の磁気



Fig. 2 Shape and dimensions of the amorphous transformer.



Fig. 3 Winding arrangement of the amorphous transformer.



Fig. 4 Appearance of the transformer with noninterleaved winding.



Fig. 5 Appearance of the transformer with interleavedwinding.

的結合が極めて強くなって漏れ磁束が減少し,近接効果に よる巻線抵抗の増加が著しく抑制される. Fig. 4 と Fig. 5 に,試作したトランスの外観を示す. Fig. 4 が一般的な重ね 巻のアモルファストランスであり, Fig. 5 が 1 層毎交互巻の アモルファストランスである. 次章では,これらのトラン スの等価回路パラメータを実測するとともに,DC-DC コン バータのシミュレーション結果と実験結果の比較・検討を 行う.

1 層毎交互巻トランスを有する DC-DC コンパータの 動作シミュレーション

本章ではまず,1層毎交互巻高周波トランスの等価回路パ ラメータを実測し,次いで,等価回路を用いた DC-DC コン バータの動作シミュレーションの結果と実験結果の比較・ 検討を行う.

高周波トランスの T 形等価回路のパラメータは、LCR メ ータを用いて実測した.具体的には、トランスの一次巻線 抵抗,並びに一次漏れインダクタンスについては、二次巻 線を短絡した後、一次巻線に LCR メータを接続して測定し た.二次側も同様に測定できる.また、励磁コンダクタン スと励磁サセプタンスは、二次側を開放した後、二次巻線 に LCR メータを接続して測定した.なお、1 層毎交互巻ト ランスの場合 、一次、二次巻線間の距離が近く、かつ向 かい合う面積も広いことから、通常よりも静電容量が大き くなることが予想されるため、LCR メータを用いて測定し、 これを T 形等価回路に追加した.

Table 1 に,通常の重ね巻トランスと1層毎交互巻トラン スについて,LCRメータを用いて,周波数3kHz,50mA の正弦波電流を印加して測定した等価回路パラメータを示 す.この表を見ると,1層毎交互巻トランスは巻線結合が強

	Interleaved	Non-interleaved
Primary winding resistance	$73.5 \text{ m}\Omega$	$218 \text{ m}\Omega$
Primary leakage inductance	2.0 μH	138 µH
Secondary winding resistance	$73.5 \text{ m}\Omega$	$286 \text{ m}\Omega$
Secondary leakage inductance	2.0 μH	138 µH
Excitation resistance	$239 \ \Omega$	$170 \ \Omega$
Excitation inductance	117 mH	104 mH
Capacitance between windings	65 nF	0.8 nF

Table 1 Equivalent circuit parameters of thetransformers.

いことから漏れインダクタンスが小さい一方で、巻線間の 静電容量が大きいことがわかる.

Fig. 6 に, 先行研究で構築した洋上風力発電用直流送電シ ステムの小型模擬実験システムを示す.風力発電機は最大 電力追従制御によって巻線電流が制御されることから, DC-DC コンバータの入力側は直流電流源で模擬する.一 方,出力側は直流系統電圧が常に一定に保たれていると仮 定し,定電圧源で模擬した.DC-DC コンバータの DC/AC 変換部では,位相シフト制御によって通流率を制御するこ とで,風況の影響によって入力電流に変動が生じても,DC リンク電圧を一定に制御することができる.

Table 2 に,実験およびシミュレーション条件と Fig. 6 の 回路のパラメータの値を示す.単純重ね巻および 1 層毎交 互巻トランスのどちらを用いた場合も,通流率 1 の際に出 力電力が 3 kW になるように,入力電流を調整した.

Fig. 7 に、単純重ね巻トランスを用いた場合の観測波形と 計算波形を示す.この時の通流率は0.6 である.この図を見 ると、計算波形と観測波形は良く一致していることがわか る.また、巻線間の結合がそれほど強くないため、入力電 圧と出力電圧の位相と振幅に差異があることがわかる.さ らに、漏れインダクタンスの影響でターンオフ後の電流減 衰に時間がかかっていることがわかる.

一方で, Fig. 8 の 1 層毎交互巻トランスを用いた場合の結 果を見ると,巻線結合が極めて強いことから入力電圧と出



Fig. 6 Circuit configuration of dc-dc converter for HVDC.

Table 2 Parameters	of the	circuit	shown	in	Fig.	6	and	the
experimental and si	mulati	ion con	ditions.					

	Interleaved	Normal
Input current I_1	10 A	9.6A
Switching frequency f		3000 Hz
Input side capacitance C_{in}		6800 µF
Output side resistance R_l		$1.177 \ \Omega$
Output side inductance L_l		16.9 mH
Grid side voltage V_g		$290 \mathrm{V}$

カ電圧がほぼ一致していることがわかる.また,漏れイン ダクタンスが小さいため,電圧印加と同時に,電流が急峻 に立ち上がっていることが確認できる.そして,計算波形 と観測波形はよく一致しており,1層毎交互巻トランスにつ いても,一般的なT形等価回路で動作が良く模擬できるこ とが了解される.



Fig. 7 Comparison of observed (top) and calculated (bottom) waveforms in the case of the non-interleaved-winding (duty = 0.6).



Fig. 8 Comparison of observed (top) and calculated (bottom) waveforms in the case of the interleaved-winding (duty = 0.6).

1 層毎交互巻トランスを有する DC-DC コンパータの効 率の測定結果

Fig. 9に、DC-DC コンバータの効率測定に用いた回路を 示す.Fig. 6に示した回路とほぼ同一であるが,前章の実験 において、1層毎交互巻トランスを用いた場合,出力電流の 変動が大きくなることが判明したことから,出力側に平滑 コンデンサ Coutを追加した.なお、容量は 3300 µF である. 前章の実験と同様に、通流率1のときに DC-DC コンバータ の出力電力が約3kWになるように入力電流の値を調整し、 各部の効率の測定を行った.Fig. 10に実験時のトランスの 観測波形を示す.この時の通流率は0.6 である.1層毎交互 巻トランスを用いた場合の結果を見ると、平滑コンデンサ を追加し、出力電圧を安定させたことにより、急峻な電流 振動を抑えられたことがわかる.

Fig. 11~14 に, DC-DC コンバータのインバータ部 (DC/AC 部), トランス部, ダイオード整流器部 (AC/DC 部), そして総合効率を示す. 各部の入出力電力は, デジタ ルパワーメータを用いて, 次式に基づき測定し,

$$P_n = \frac{1}{T} \int_0^T v_n \times i_n \, dt \tag{1}$$

各部の効率は、以下の式を用いて算定した.

$$\eta_{inv} = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \,(\%) \tag{2}$$
$$\eta_{tr} = \frac{P_3}{P_2} \times 100 \,(\%) \tag{3}$$

$$\eta_{diode} = \frac{P_4}{P_3} \times 100 \,(\%) \tag{4}$$

$$\eta_{dc-dc} = \frac{P_4}{P_1} \times 100 \,(\%) \tag{5}$$

Fig. 11 のインバータ効率を見ると、単純重ね巻トランス より 1 層毎交互巻トランスを用いた方が僅かに効率が高い ことがわかる.また、単純重ね巻トランスの場合、通流率 1 付近で効率が低下していることがわかるが、これは単純重 ね巻トランスは漏れインダクタンスが大きく、通流率 1 付 近では電流が完全に減衰する前にスイッチングが行われて いることが原因だと考えられる.一方、1 層毎交互巻トラン スでは、漏れインダクタンスが極めて小さいため、電流が デッドタイム内に瞬時に減衰し、その結果、ゼロ電流スイ



Fig. 9 Circuit configuration of efficiency measurement for the dc-dc converter.



Fig. 10 Comparison of the observed voltage and current waveforms of the transformer with interleaved-winding (top) and non-interleaved-winding (bottom) (duty = 0.6).

ッチングとなり,通流率1付近でも効率は高い.通常の漏 れインダクタンスの大きいトランスでは,スナバコンデン サなどを用いて,ソフトスイッチングを行うのが一般的で あるが,1層毎交互巻トランスはスナバレスでゼロ電流スイ ッチングが可能であることから,部品点数削減のメリット があることが明らかとなった.

Fig. 12 のトランス効率については、単純重ね巻では近接 効果による銅損が大きく、すべての領域で 1 層毎交互巻の 方が高効率であることがわかる.

以上の結果により, Fig. 14 の DC-DC コンバータの総合 効率を見ると, 1 層毎交互巻トランスを用いた方が 3~5% 程度効率が高いことがわかる.



Fig. 11 Efficiency comparison of the inverter.





Fig. 12 Efficiency Comparison of the transformers.

Fig. 13 Efficiency comparison of the diode rectifier.



Fig. 14 Efficiency comparison of the dc-dc converter.

5. まとめ

以上,本稿では1層毎交互巻高周波トランスの等価回路 パラメータを実測するとともに,DC-DCコンバータのシミ ュレーション結果と実験結果の比較・検討を行った.また, 小型模擬実験システムを用いて,効率の実測を行った.

その結果,1層毎交互巻トランスについても,一般的なT 形等価回路を用いることで,動作を精度良く模擬できるこ とが明らかになった.また,1層毎交互巻トランスを用いた DC-DC コンバータの効率は,ゼロ電流スイッチングや近接 効果抑制により,いわゆる通常の重ね巻トランスを用いた 場合よりも3~5%改善されることが実証された.

今後は,1層毎交互巻トランスを用いた DC-DC コンバー タの各部スイッチング波形を実測することで,より詳細な 動作の検証を行う予定である.

References

- 1) NEDO "Saiseikanou Enerugi Gijutu Hakusyo" (2010) (in Japanese).
- J. Twidell and G. Gaudiosi, "Youjou Huuryoku Hatuden", Japan Wind Energy Association (2011) (in Japanese).
- K. Sano and M. Takasaki, "A DC Boost Conversion System Consisting of Multiple Converter Modules for HVDC Transmission of Offshore Wind Power", *CRIEPI Research Report*, R12013 (2013) (in Japanese).
- H. Tanaka, K. Nakamura, and O. Ichinokura, *IEEJ*, MAG-14-29 (2014) (in Japanese).
- H. Tanaka, K. Nakamura, and O. Ichinokura, J. Magn. Soc. Jpn., 40, 35 (2016).
- 6) T. Fujii and K. Nakamura, *IEEJ*, MAG-17-137 (2017) (in Japanese).

2019年10月10日受理, 2019年12月9日採録